

تخمین ویژگی‌های مکانیکی ماسه‌سنگ‌ها با استفاده از آزمایش سرعت موج و چکش‌اشمیت

یاسین عبدی^{۱*} و غلامرضا خانلری^۲

۱ - گروه زمین‌شناسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد

۲ - گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان

نویسنده مسئول: *abdi.ya@lu.ac.ir

دریافت: ۹۷/۳/۲۹ پذیرش: ۹۷/۶/۳۱

چکیده

مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی برزلی از جمله ویژگی‌های مهم سنگ‌ها هستند که به‌طور گسترده‌ای در مهندسی سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرند. تعیین این ویژگی‌ها در آزمایشگاه یک فرآیند زمان‌بر، مشکل و پرهزینه است. لذا در این مطالعه سعی شده است که روابط تجربی برای تخمین ویژگی‌های مکانیکی ماسه‌سنگ‌ها با استفاده از سرعت سیر موج و چکش‌اشمیت به عنوان دو آزمایش غیرمخرب و ساده توسعه داده شود. به همین منظور تعداد ۳۰ بلوک سنگی از نقاط مختلف سازند قرمز بالایی در غرب قم جمع‌آوری شده و پس از انجام عملیات مغزه‌گیری مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. این آزمایش‌ها شامل تعیین سرعت موج، عدد سختی اشمیت، مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی برزلی می‌باشد. با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی، بهترین روابط تجربی بین ویژگی‌های مکانیکی و سرعت موج یا عدد سختی چکش‌اشمیت پیشنهاد شده است. به منظور اعتبارسنجی روابط تجربی، آزمون F و t انجام شده است که نتایج صحت و اعتبار این روابط را تأیید می‌کند. همچنین، مقایسه بین نتایج نشان می‌دهد که سرعت موج در مقایسه با عدد سختی چکش اشمیت قابلیت بیش‌تری برای پیش‌بینی ویژگی‌های مکانیکی ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه دارد.

واژه‌های کلیدی: ویژگی‌های مکانیکی، چکش اشمیت، سرعت موج، ماسه‌سنگ، رگرسیون

مقدمه

هم‌چنین به منظور مقایسه بهتر، روابط توسعه داده شده در این مطالعه نیز در این جدول ارائه شده است. کاراگیل و شکور (۱۹۹۰) یک رابطه تجربی مهم بین مقاومت فشاری تک‌محوری و عدد سختی چکش‌اشمیت برای سنگ‌های کربناته پیشنهاد داده‌اند. کاتز و همکاران (۲۰۰۰) ارتباط بین عدد سختی چکش‌اشمیت با مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته انواع مختلف سنگ‌ها را با هم مقایسه کردند. ایلماز و سندیر (۲۰۰۲) بر اساس نتایج آزمایش‌های تجربی بر روی سنگ ژئپس، یک رابطه مناسب ($R=0.91$) بین مقاومت و عدد سختی چکش‌اشمیت بدست آورد. یاشار و اردوغان (۲۰۰۴) با بررسی سنگ‌آهک، ماسه‌سنگ، مرمر و بازالت یک رابطه توانی با ضریب رگرسیون 0.92 بین مقاومت فشاری تک محوری و چکش‌اشمیت معرفی نمود. دینسر و همکاران (۲۰۰۴) با بررسی آندزیت‌ها، توف‌ها و بازالت‌ها روابط تجربی مهمی بین عدد سختی چکش‌اشمیت با مقاومت

تعیین ویژگی‌های مهندسی سنگ‌ها به‌خصوص مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی برزلی یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های مطالعات ژئوتکنیکی است. تعیین این پارامترها نیازمند صرف زمان فراوان برای آماده‌سازی نمونه‌های با کیفیت و هم‌چنین استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی گران‌قیمت است. بنابراین، به منظور جلوگیری از صرف زمان و هزینه فراوان می‌توان از روش‌های غیرمخرب و آسانی همچون سرعت موج و چکش‌اشمیت استفاده کرد. استفاده از این آزمایش‌ها به خاطر روش استفاده بسیار ساده، هزینه کم، قابلیت حمل آسان و هم‌چنین غیرمخرب بودن، روز به روز در حال افزایش است. محققین زیادی روابط بین ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها با عدد سختی چکش‌اشمیت را بررسی کرده‌اند. جدول ۱ برخی از روابط تجربی بین چکش اشمیت با ویژگی‌های مکانیکی انواع مختلف سنگ‌ها که توسط محققین دیگر پیشنهاد شده است را نشان می‌دهد.

فشاری تک‌محوری و سرعت موج توسعه داد. سرکار و همکاران (۲۰۱۲) یک رابطه بین مقاومت فشاری تک محوری و سرعت موج برای انواع مختلف سنگ‌ها با ضریب رگرسیون ۰/۹۳ گزارش کرده‌اند. بوستان و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از آزمایش سرعت موج و چکش‌اشمیت به پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ مگنتیت پرداخته‌اند. بر این اساس آن‌ها روابط خطی و غیرخطی ساده و چند متغیره‌ای به منظور تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری پیشنهاد کرده‌اند. جمشیدی و همکاران (۲۰۱۶) با بررسی ارتباط بین ویژگی‌های مکانیکی تراورتن‌ها با عدد سختی اشمیت و سرعت موج گزارش کرده‌اند که سرعت موج از درجه اطمینان بالاتری برای تخمین ویژگی‌های مکانیکی برخوردار است. جدول ۲ روابط تجربی بین سرعت موج و ویژگی‌های مکانیکی گزارش شده توسط سایر محققین و توسعه داده شده در این مطالعه برای انواع مختلف سنگ‌ها را نشان می‌دهد.

در این مقاله روابط تجربی بین سرعت موج و چکش اشمیت با ویژگی‌های مکانیکی ماسه‌سنگ‌های سازند قرمز بالایی به منظور تخمین مقاومت فشاری تک محوری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی برزیلی مورد بررسی قرار گرفته است.

فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته به ترتیب با ضرایب رگرسیون ۰/۹۵ و ۰/۸۵ پیشنهاد نموده‌اند. همچنین از آنجائی که روش‌های التراسونیک غیرمخرب و ارزان هستند، به‌طور گسترده‌ای برای تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی سنگ‌ها به کار گرفته می‌شوند (دیپیر و میلر ۱۹۶۶، قهرمان ۲۰۰۱، یاشار و اردوغان ۲۰۰۴، شارما و سینگ ۲۰۰۸، قهرمان و یکین ۲۰۰۸، حق‌نژاد و همکاران ۱۳۸۹، نجیبی و همکاران ۱۳۹۰، قهرمان و همکاران ۲۰۰۹، یاگیز ۲۰۱۱، سرکار و همکاران ۲۰۱۱، شارما و همکاران ۲۰۱۱، مارتینز و همکاران ۲۰۱۲، آلتینداگ ۲۰۱۲، بوستان و همکاران ۱۳۹۳، عظیمیان و اجل‌لوئیان ۲۰۱۵، جمشیدی و همکاران ۲۰۱۶). سرعت موج در سنگ‌ها ارتباط بسیار نزدیکی با ویژگی‌های سنگ بکر دارد (خان دلوال و رانجیت ۲۰۱۰). عوامل مؤثر بر سرعت موج در سنگ‌ها شامل ترکیب کانی‌شناسی و بافت سنگ، تخلخل، دانسیته، آب منفذی، فشار منفذی، دما، هوازگی و دگرسانی، ناپیوستگی‌ها، ویژگی‌های درزه‌ها و ناهمسانگردی می‌باشند (شارما و سینگ ۲۰۰۸). قهرمان (۲۰۰۱) با بررسی ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوری و سرعت موج انواع مختلف سنگ‌ها، رابطه $UCS=9.95V_p^{1.21}$ را ارائه نمود. یاگیز (۲۰۱۱) بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی تراورتن، سنگ آهک و شیست، یک رابطه ساده و خوب بین مقاومت

جدول ۱. روابط تجربی بین چکش اشمیت و ویژگی‌های مکانیکی

R یا R ²	رابطه	نوع سنگ	منبع
R = 0.72	UCS = 2H _R	۳۰ نوع سنگ رسوبی	سینگ و همکاران (۱۹۸۳)
R ² = 0.70	UCS = 0.994H _R - 0.383	-	حرمی و دی مارکو (۱۹۸۵)
-	UCS = 1.8 × 10 ⁻² (H _R × pd) + 2.9	کربناته	کاراگیل و شکور (۱۹۹۰)
R = 0.78	UCS = 6.97e ^{0.014 H_R × p}	۴۸ نوع سنگ	قهرمان (۲۰۰۱)
R = 0.98	UCS = exp.(0.818 + 0.059H _R)	ژیپس	ایلماز و سندیر (۲۰۰۲)
R = 0.89	UCS = 4 × 10 ⁻⁶ (H _R) ^{4.2917}	سنگ آهک، ماسه سنگ، بازالت، مرمر	یاشار و اردوغان (۲۰۰۴)
R ² = 0.94	UCS = 0.0137H _R ^{2.2721}	رسوبی، آذرین، دگرگونی	کیلیچ و تیمان (۲۰۰۸)
R ² = 0.65	UCS = 6.59H _R - 212.63	ماسه سنگ، سنگ آهک	کوبان اوغلو و سلیک (۲۰۰۸)
R = 0.58	BTS and H _R	ماسه سنگ	بل و لیندسی (۱۹۹۹)
R = 0.72	BTS and H _R	ماسه سنگ	بل (۱۹۷۸)
R = 0.80	BTS and H _R	ژیپس و انیدریت	بل (۱۹۹۴)
R ² = 0.81	UCS = 78.59ln(H _R) - 239.2	تراورتن	جمشیدی و همکاران (۲۰۱۶)
R ² = 0.72	BTS = 6.26ln(H _R) - 17.99	تراورتن	جمشیدی و همکاران (۲۰۱۶)
R = 0.912	UCS = 3.615H _R - 42.57	ماسه سنگ	این مطالعه
R = 0.854	E = 0.443H _R - 3.503	ماسه سنگ	این مطالعه
R = 0.924	BTS = 0.349H _R - 4.797	ماسه سنگ	این مطالعه

H_R: عدد سختی اشمیت، p_q: دانسیته خشک

جدول ۲. روابط تجربی بین سرعت موج و ویژگی‌های مکانیکی

R یا R ²	رابطه	نوع سنگ	منبع
R = 0.83	UCS = 9.95V _p ^{1.21}	۴۸ نوع سنگ مختلف	قهرمان (۲۰۰۱)
R = 0.81	UCS = (V _p -2.0195)/0.032	آهک، مرمر و دولومیت	یاشار و اردوغان (۲۰۰۴)
R ² = 0.67	UCS = 0.056V _p - 191.00	ماسه‌سنگ، سنگ‌آهک	کوبان اوغلو و سلیک (۲۰۰۸)
R ² = 0.94	UCS = 2.304V _p ^{2.4315}	رسوبی، آذرین، دگرگونی	کیلیچ و تیمان (۲۰۰۸)
R ² = 0.90	UCS = 0.0642V _p -117.99	رسوبی، آذرین، دگرگونی	شارما و سینگ (۲۰۰۸)
R ² = 0.96	UCS= 0.133V _p -227.10	-	خان دلوال و سینگ (۲۰۰۹)
R ² = 0.83	UCS = 0.14V _p - 899.33	پریدوتیت	دیامانتیس و همکاران (۲۰۱۱)
R = 0.92	UCS = 2.304V _p ^{3.543}	تراورتن، سنگ‌آهک و شیست	یاگیز (۲۰۱۱)
R ² = 0.93	UCS = 0.038V _p -50	۱۳ نوع سنگ مختلف	سرکار و همکاران (۲۰۱۲)
R ² = 0.91	UCS=0.026 V _p -20.47	مارن	اعظمیان و اجل لوثیان (۲۰۱۵)
R ² = 0.945	UCS = 101.1 ln(V _p) - 802.8	تراورتن	جمشیدی و همکاران (۲۰۱۶)
R ² = 0.84	E=19.87 V _p -27813	-	واسکونسوس و همکاران (۲۰۰۷)
R ² = 0.97	E=4.9718 V _p -7151	-	خان دلوال و سینگ (۲۰۰۹)
R ² = 0.74	E=0.0015 V _p -2.516	-	کارتولوس و همکاران (۲۰۱۱)
R ² = 0.81	E=0.041 V _p -264.15	-	دیامانتیس و همکاران (۲۰۱۱)
R ² = 0.95	E=20.1 V _p -53	تراورتن، سنگ‌آهک و شیست	یاگیز (۲۰۱۱)
R ² = 0.79	E=0.919 V _p ^{1.9122}	-	آلتینداغ (۲۰۱۲)
R ² = 0.89	E=0.008V _p -5.619	مارن	اعظمیان و اجل لوثیان (۲۰۱۵)
R ² = 0.92	BTS = 0.49V _p ^{1.8723}	رسوبی، آذرین، دگرگونی	کیلیچ و تیمان (۲۰۰۸)
R ² = 0.926	BTS = 8.44 ln(V _p) - 66.2	تراورتن	جمشیدی و همکاران (۲۰۱۶)
R = 0.939	UCS = 0.041V _p - 15.40	ماسه‌سنگ	این مطالعه
R = 0.912	E = 0.005V _p + 0.621	ماسه‌سنگ	این مطالعه
R = 0.904	BTS = 0.003V _p - 1.680	ماسه‌سنگ	این مطالعه

مواد و روش‌ها

به منظور انجام این پژوهش، تعداد ۳۰ بلوک بزرگ در ابعاد ۴۰×۴۰×۲۰ سانتی‌متر از بخش‌های مختلف سازند قرمز بالایی در غرب قم انتخاب و به آزمایشگاه انتقال داده شده‌اند. موقعیت نقاط نمونه‌برداری در شکل ۱ و مختصات آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. سن سازند قرمز بالایی در منطقه مورد مطالعه متعلق به میوسن میانی تا بالایی می‌باشد. در آزمایشگاه از بلوک‌های تهیه شده با استفاده از یک دستگاه مغزه‌گیر دورانی اقدام به مغزه‌گیری با قطر ۵۴ میلی‌متر و نسبت طول به قطر بین ۲/۵۰ تا ۳/۰۰ شده است. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها شامل دانسیته خشک، تخلخل، سرعت سیر موج طولی، مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی برزلی نیز اندازه‌گیری شده است.

به‌منظور انجام مطالعات پتروگرافی از هر بلوک تعداد دو مقطع نازک عمود بر هم تهیه شده است. همچنین یک میکروسکوپ پلاریزان نوری برای تعیین ترکیب

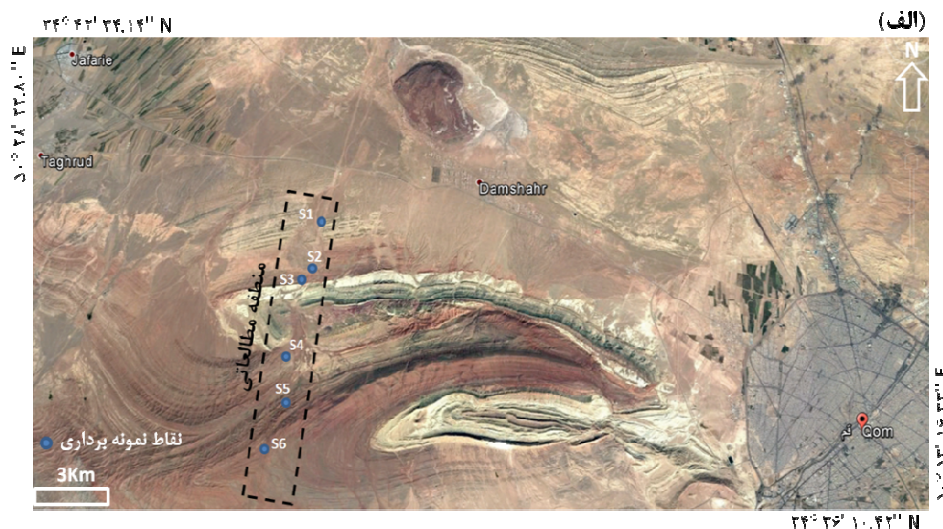
کانی‌شناسی ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه، استفاده شده است. بر اساس مطالعات پتروگرافی انجام شده، ماسه‌سنگ‌های مورد استفاده در این مطالعه با توجه به طبقه‌بندی فولک (۱۹۷۴) عمدتاً در دو رده لیت‌آرنایت‌ها و فلدسپاتیک لیت‌آرنایت‌ها قرار می‌گیرند. همچنین با توجه به درصد فراوانی خرده‌سنگ‌ها، ماسه‌سنگ‌های لیت‌آرنایت به سه دسته ولک‌آرنایت‌ها، فیل‌آرنایت‌ها و کالک‌لیتایت‌ها تقسیم‌بندی می‌شوند. بر اساس نتایج ترکیب کانی‌شناسی این دسته از ماسه‌سنگ‌ها شامل خرده‌سنگ (۸۰-۵۶ درصد)، فلدسپات (۲۴-۱۲ درصد)، کوارتز (۱۴-۶ درصد)، سیمان (۱۰-۵ درصد) و چرت و میکا حداکثر ۱ درصد می‌باشند.

بحث و نتایج

همان‌طور که پیش‌تر نیز عنوان شد تعداد ۱۵۰ نمونه مغزه استوانه‌ای برای بررسی ارتباط بین ویژگی‌های مکانیکی با سرعت موج و عدد چکش‌اشمیت تهیه و آزمایش‌های جامعی به منظور تعیین درصد تخلخل،

تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی، تعداد حداقل ۵ نمونه از هر بلوک مورد آزمایش قرار گرفته است و در نهایت میانگین نتایج گزارش شده است.

دانسیته خشک، سرعت موج، مقاومت فشاری تک محوری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی برزیلی بر روی آن‌ها انجام شده است. لازم به ذکر است که به‌منظور



شکل ۱. الف) موقعیت نقاط نمونه‌برداری، ب) تصاویری از ایستگاه‌های نمونه‌برداری

جدول ۳. مختصات جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری

مختصات جغرافیایی		شماره ایستگاه
عرض	طول	
۵۰° ۲۸' ۳۱.۲۵" E	۳۴° ۴۲' ۳۴.۱۴" N	(S1) ایستگاه اول
۵۰° ۲۸' ۱۰.۴۵" E	۳۴° ۴۱' ۳۴.۹۹" N	(S2) ایستگاه دوم
۵۰° ۳۸' ۱۰.۴۵" E	۳۴° ۴۱' ۲۵.۲۵" N	(S3) ایستگاه سوم
۵۰° ۳۷' ۳۵.۲۷" E	۳۴° ۳۹' ۵۶.۳۳" N	(S4) ایستگاه چهارم
۵۰° ۳۷' ۱۹.۸۴" E	۳۴° ۳۸' ۲۷.۲۹" N	(S5) ایستگاه پنجم
۵۰° ۳۷' ۰۶.۷۴" E	۳۴° ۳۶' ۲۸.۰۴" N	(S6) ایستگاه ششم

مقاومت کششی را کنترل می‌کنند. در این مطالعه، دانسیته و تخلخل مؤثر به روش اشباع و مطابق با دستورالعمل (ISRM 1981) تعیین شده است. نتایج مربوط به تعیین دانسیته و تخلخل برای هر بلوک در

خصوصیات فیزیکی ماسه‌سنگ‌ها
دانسیته و تخلخل دو ویژگی فیزیکی مهم هستند که سایر خصوصیات سنگ از قبیل سرعت موج، عدد چکش اشمیت، مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و

جدول ۴ ISRM (1981) بر روی نمونه‌های مغزه استوانه‌ای شکل انجام شده است (جدول ۴). ملاحظه می‌گردد که مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین سرعت موج نمونه‌ها به ترتیب ۱۰۸۷/۹۰، ۳۳۵۶/۸۴ و ۲۴۰۶/۷۴ متر بر ثانیه حاصل شده است.

جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین تخلخل به ترتیب ۴/۵۰، ۱۴/۵۱ و ۹/۰۵ درصد است. این در حالی است که این مقادیر برای دانسیته خشک نمونه‌ها به ترتیب ۲/۰۷، ۲/۶۳ و ۲/۳۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. سرعت موج طولی نمونه‌ها مطابق با دستورالعمل

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه

شماره نمونه	تخلخل (%)	دانسیته (gr/cm ³)	سرعت موج (m/sec)	عدد اشمیت (N)	مقاومت کششی برزیلی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
۱	۴/۶۲	۲/۶۰	۳۲۷۰	۴۵	۱۱/۹۸	۱۲۸/۱۳	۲۰/۴۳
۲	۵/۱۳	۲/۵۱	۳۱۲۰/۷۱	۴۴	۹/۴۳	۱۰۴/۶۱	۵۰/۷۱
۳	۷/۹۶	۲/۴۳	۲۸۱۳/۰۶	۳۴	۷/۴۵	۸۹/۱۴	۱۳/۱۷
۴	۵/۶۲	۲/۵۲	۲۶۹۴/۹۲	۳۸	۸/۰۰	۸۲/۵۰	۱۲/۱۳
۵	۴/۵۰	۲/۶۳	۳۳۵۶/۸۴	۴۵	۱۲/۳۲	۱۳۱/۱۳	۱۵/۶۹
۶	۵/۷۸	۲/۵۱	۲۸۶۸/۴۶	۴۳	۹/۹۶	۱۱۶/۶۸	۱۴/۸۳
۷	۷/۸۹	۲/۴۶	۲۶۴۹/۷۱	۳۳	۶/۴۱	۸۷/۴۳	۱۱/۵۲
۸	۱۴/۵۱	۲/۰۷	۱۰۸۷/۹۰	۲۳	۲/۳۵	۱۹/۹۴	۲/۹۳
۹	۵/۷۱	۲/۵۸	۲۸۴۸/۱۴	۴۴	۱۱/۶۵	۱۲۰/۱۲	۱۳/۵۱
۱۰	۵/۰۱	۲/۶۱	۳۰۰۵/۱۳	۴۶	۱۱/۸۷	۱۲۰/۱۴	۱۴/۲۴
۱۱	۵/۶۴	۲/۵۷	۳۰۸۵/۴۶	۴۴	۸/۹۷	۱۱۲/۱۳	۱۴/۶۷
۱۲	۷/۴۸	۲/۴۳	۲۸۲۷/۰۹	۳۹	۸/۳۲	۸۹/۹۷	۱۴/۸۷
۱۳	۵/۰۱	۲/۵۴	۳۳۳۴/۸۰	۴۳	۱۱/۹۳	۱۱۴/۲۲	۱۷/۹۶
۱۴	۶/۵۸	۲/۴۱	۲۷۹۰	۴۴	۱۰/۳۳	۱۱۰/۷۵	۱۶/۰۵
۱۵	۱۰/۲۷	۲/۲۰	۲۰۸۰	۳۰	۵/۶۲	۶۵/۰۶	۱۱/۳۴
۱۶	۶/۲۹	۲/۵۰	۲۸۱۰	۴۰	۶/۸۶	۹۴/۷۸	۱۳/۶۱
۱۷	۱۱/۶۲	۲/۱۷	۱۹۶۰	۲۹	۵/۶۸	۸۲/۵۶	۱۰/۴۸
۱۸	۱۳/۲۵	۲/۱۶	۱۹۰۰	۲۸	۵/۵۷	۷۸/۱۹	۱۲/۲۶
۱۹	۹/۳۳	۲/۲۵	۲۱۰۰	۳۲	۵/۷۶	۸۲/۷۶	۱۳/۴۲
۲۰	۱۳/۹۰	۲/۱۲	۱۶۵۰	۲۸	۴/۶۸	۵۴/۲۳	۹/۷۵
۲۱	۱۳/۲۳	۲/۱۲	۱۵۲۰	۲۸	۵/۴۱	۵۲/۶۴	۶/۵۴
۲۲	۱۳/۲۵	۲/۲۶	۲۰۸۰	۲۶	۵/۴۹	۶۱/۷۸	۹/۱۷
۲۳	۷/۵۳	۲/۴۰	۲۸۸۰	۳۹	۷/۴۳	۸۹/۴۷	۱۲/۲۵
۲۴	۱۳/۱۷	۲/۱۸	۲۰۴۰	۳۰	۵/۵۳	۷۴/۱۶	۹/۷۲
۲۵	۱۲/۱۷	۲/۱۵	۱۲۵۰	۲۷	۳/۱۵	۵۶/۲۱	۵/۴۵
۲۶	۱۳/۱۱	۲/۱۸	۱۴۳۰	۲۶	۴/۵۴	۴۲/۱۲	۶/۳۲
۲۷	۱۱/۰۲	۲/۲۵	۱۷۵۰	۳۲	۵/۲۱	۷۰/۳۴	۹/۲۷
۲۸	۱۲/۴۲	۲/۲۱	۱۹۵۰	۲۹	۶/۷۳	۶۵/۲۳	۱۰/۲۱
۲۹	۹/۲۳	۲/۳۷	۲۵۱۰	۳۴	۷/۵۴	۸۴/۱۲	۱۱/۷۱
۳۰	۱۰/۱۱	۲/۳۴	۲۵۴۰	۳۱	۷/۸۷	۷۱/۱۷	۱۲/۱۵
حداقل	۴/۵۰	۲/۰۷	۱۰۸۷/۹۰	۲۳	۲/۳۵	۱۹/۹۴	۲/۹۳
حداکثر	۱۴/۵۱	۲/۶۳	۳۳۵۶/۸۴	۴۵	۱۲/۳۲	۱۳۱/۱۳	۱۵/۶۹
میانگین	۹/۰۵	۲/۳۶	۲۴۰۶/۷۴	۳۵/۰۸	۷/۴۷	۸۴/۲۷	۱۲/۰۴
انحراف استاندارد	۳/۳۷	۰/۱۸	۶۴۹/۱۴۵	۷/۲۲	۲/۷۳	۲۸/۶۲	۳/۷۴

خصوصیات مکانیکی ماسه‌سنگ‌ها

به طور کلی در این پژوهش حداقل ۱۵۰ آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری انجام شده است. به این منظور، نمونه‌های مغزه با قطر ۵۴/۷ میلی‌متر و نسبت طول به عرض بین ۲/۵ تا ۳ و مطابق با دستورالعمل ISRM (1981) مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. با توجه به نتایج حاصل شده، ملاحظه می‌گردد که مقاومت فشاری نمونه‌ها بین ۱۹/۹۴ تا ۱۳۱/۱۳ مگاپاسکال متغیر است. میانگین مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها نیز ۸۴/۲۷ مگاپاسکال به دست آمده است. بر این اساس مشاهده شد که بیش‌ترین میزان مقاومت برای نمونه شماره ۵ و کم‌ترین مقاومت نیز برای نمونه ماسه‌سنگ شماره ۸ به دست آمده است. همچنین مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین مدول الاستیسیته ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه به ترتیب ۲/۹۳، ۲۰/۴۳ و ۱۲/۰۴ گیگاپاسکال می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، مقادیر

سختی چکش‌اشمیت نیز بین ۲۳ تا ۴۶ متغیر است. میانگین سختی چکش‌اشمیت برای ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه نیز ۳۰ می‌باشد. برخی از نمونه‌هایی که آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی آن‌ها انجام شده است، در شکل ۲ نشان داده شده است.

همچنین در این مطالعه، آزمایش مقاومت کششی برزیلی بر اساس دستورالعمل (1981) ISRM بر روی نمونه‌های ماسه‌سنگ انجام شده است. این آزمایش بر روی نمونه‌های با قطر ۵۴/۷ میلی‌متر و با نسبت قطر به ضخامت معادل ۲ انجام شده است (با ضخامت تقریباً معادل ۲۷ میلی‌متر). بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۴، مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین مقاومت کششی برزیلی نمونه‌های مورد مطالعه ۲/۳۵، ۱۲/۳۲ و ۷/۴۷ مگاپاسکال به دست آمده است. در شکل ۲، تعدادی نمونه شکسته شده بعد از انجام آزمایش برزیلی نشان داده شده است.



شکل ۲. برخی از نمونه‌های ماسه‌سنگ شکسته شده در آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و برزیلی

ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی

به منظور توصیف ارتباط بین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های ماسه‌سنگ مورد مطالعه، آنالیزهای رگرسیون بر روی نتایج آزمایش‌ها انجام شده است. بر این اساس، معادله بهترین خط در سطوح اطمینان ۹۵٪ و ضرائب همبستگی (r) برای هر آزمایش انجام شده است. در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ روابط خطی بین مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی برزیلی به ترتیب با سرعت موج و عدد سختی چکش‌اشمیت نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ - الف نشان داده شده است، ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوری و سرعت موج به صورت یک معادله خطی با ضریب همبستگی خیلی خوب ($r = 0.939$) می‌باشد (رابطه ۱).

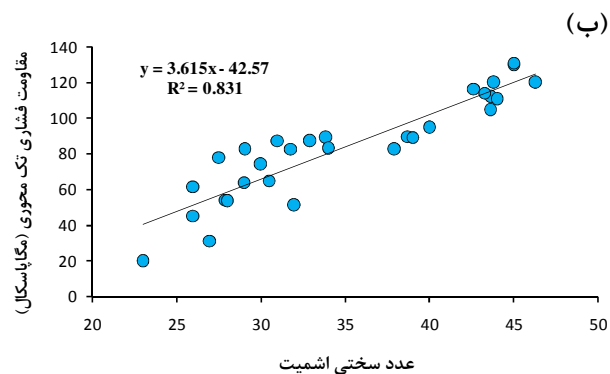
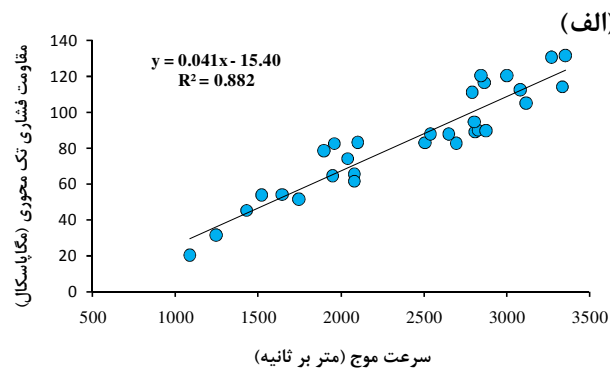
$$UCS = 0.041V_p - 15.40 \quad (1)$$

در این رابطه، UCS مقاومت فشاری تک‌محوری بر حسب مگاپاسکال و V_p سرعت موج نمونه‌های ماسه‌سنگ بر حسب متر بر ثانیه می‌باشد. نتایج مشابهی توسط کوبان اوغلو و سلیک (۲۰۰۸)، خان دلوال و سینگ (۲۰۰۹)،

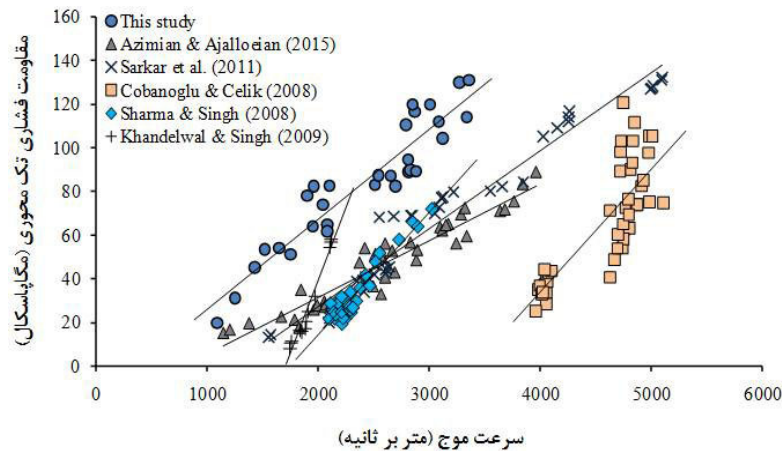
دیامانتیس و همکاران (۲۰۱۱)، سرکار و همکاران (۲۰۱۲)، عظیمیان و اجل لوثیان (۲۰۱۵) برای سنگ‌های مختلف پیشنهاد شده است. با توجه به شکل ۳ - ب نیز مشاهده می‌شود که بهترین معادله برای توصیف ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوری و عدد سختی چکش‌اشمیت، یک معادله خطی با ضریب همبستگی ۰/۹۱۱ است (رابطه ۲).

$$UCS = 3.615H_R - 42.57 \quad (2)$$

در این رابطه، H_R عدد سختی چکش‌اشمیت می‌باشد. نتایج مشابهی توسط حرمی و دی مارکو (۱۹۸۵) و کوبان اوغلو و سلیک (۲۰۰۸) ارائه شده است. این در حالی است که جمشیدی و همکاران (۲۰۱۶) برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری تراورتن‌ها یک معادله لگاریتمی با ضریب همبستگی ۰/۹۰ پیشنهاد کرده‌اند. به منظور مقایسه بهتر روابط ارائه شده در این مطالعه با نتایج سایر محققین، ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوری و سرعت موج برای محققین مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳. ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوری و (الف) سرعت موج، (ب) عدد سختی اشمیت



شکل ۴. مقایسه ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوری و سرعت موج برای محققین مختلف

به‌طور مشابه، بهترین معادله توصیف کننده ارتباط بین مدول الاستیسیته و عدد سختی چکش‌اشمیت نیز یک رابطه خطی و با ضریب همبستگی ۰/۸۵۴ است (شکل ۵-ب، معادله ۴):

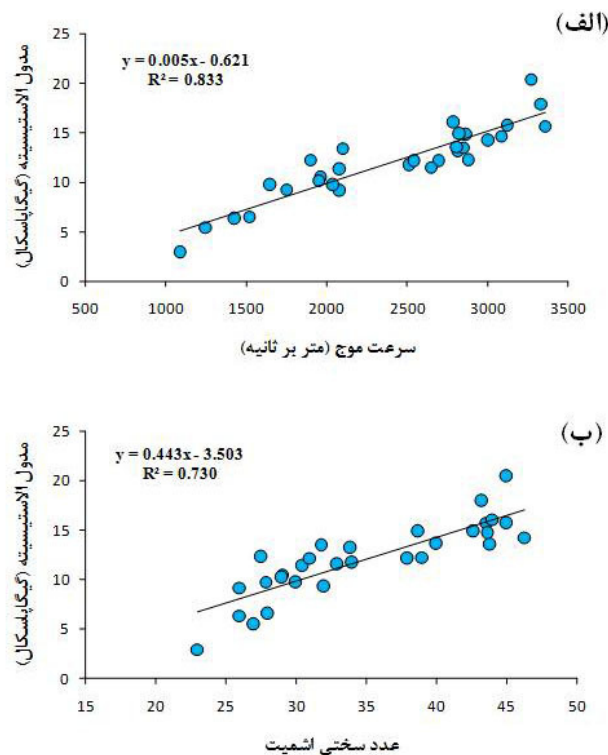
$$E = 0.443H_R - 3.503 \quad (۴)$$

مقایسه بین معادلات ۳ و ۴ نشان می‌دهد که سرعت موج در مقایسه با عدد سختی چکش‌اشمیت، ارتباط خطی به مراتب قوی‌تری با مدول الاستیسیته دارد.

در شکل ۵ الف نیز ارتباط بین مدول الاستیسیته (E) و سرعت موج برای تمامی نمونه‌ها نشان داده شده است. بهترین ارتباط بین این دو پارامتر، یک ارتباط خطی است که دارای ضریب همبستگی بسیار قوی ۰/۹۱۲ می‌باشد و با معادله ۳ نشان داده شده است:

$$E = 0.005V_p + 0.621 \quad (۳)$$

در این رابطه، E مدول الاستیسیته بر حسب گیگاپاسکال، و V_p سرعت موج نمونه‌های ماسه‌سنگ بر حسب متر بر ثانیه است.



شکل ۵. ارتباط بین مدول الاستیسیته و (الف) سرعت موج و (ب) عدد سختی اشمیت

مقاومت کششی برزیلی و عدد سختی چکش اشमित نیز یک معادله خطی است که دارای ضریب همبستگی ۰/۹۲۴ است (شکل ۶ - ب). این رابطه توسط معادله ۶ نشان داده شده است:

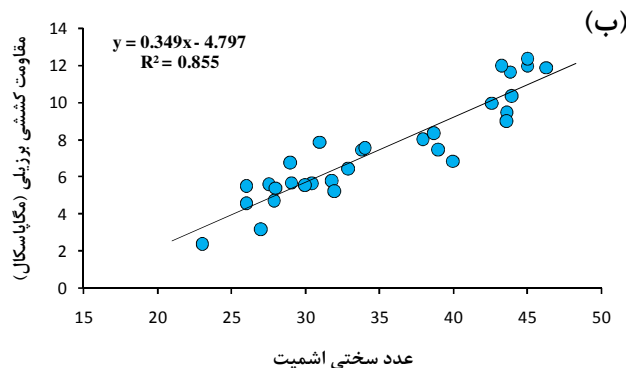
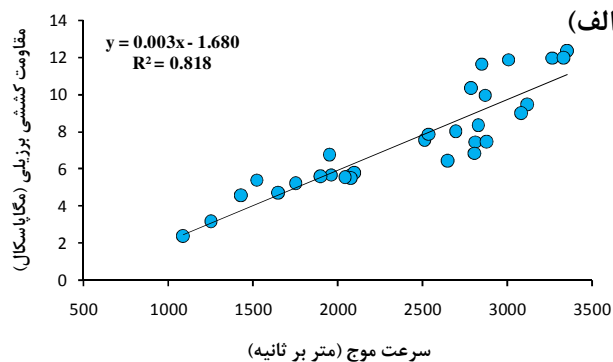
$$BTS = 0.349H_R - 4.797 \quad (۶)$$

در این رابطه H_R عدد سختی چکش‌اشمیت است. جمشیدی و همکاران (۲۰۱۶) به منظور توصیف ارتباط بین مقاومت کششی برزیلی و عدد سختی چکش اشमित، معادلات لگاریتمی را معرفی نموده‌اند (جدول‌های ۱ و ۲).

ارتباط بین مقاومت کششی برزیلی با سرعت موج و عدد سختی چکش اشमित در شکل ۶ نشان داده شده است. بر این اساس ملاحظه می‌گردد که بهترین رابطه برای توصیف مقاومت کششی برزیلی و سرعت موج یک معادله خطی با ضریب همبستگی بسیار خوب بوده و برابر ۰/۹۰۴ است (معادله ۵).

$$BTS = 0.003V_p - 1.680 \quad (۵)$$

در این رابطه، BTS مقاومت کششی برزیلی نمونه‌های ماسه‌سنگ بر حسب مگاپاسکال می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۶ - ب نشان داده شده است، بهترین رابطه بین



شکل ۶. ارتباط بین مقاومت کششی برزیلی و (الف) سرعت سیر موج و (ب) عدد سختی اشमित

(E)، مقاومت کششی برزیلی (BTS)، سرعت موج (V_p) و عدد سختی چکش اشमित (N) انجام شده است. به منظور تخمین ویژگی‌های مقاومتی ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه، بهترین روابط چند متغیره خطی بین پارامترهای $UCS-V_p-N$ ، $E-V_p-N$ و $BTS-V_p-N$ استخراج شده است. بر این اساس، ۳ معادله رگرسیونی چند متغیره به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی برزیلی به ترتیب با ضرایب

آنالیز رگرسیون چند متغیره

با توجه به اینکه روش رگرسیون تک متغیره ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی را به روشنی نشان نمی‌دهد، متغیرهای مهم و معنادار، به منظور درک ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی با استفاده از رگرسیون چند متغیره، مورد بررسی قرار گرفتند تا این ارتباط توسط متغیرهای چندگانه بهتر نشان داده شود. به همین منظور، آنالیز رگرسیون به وسیله پارامترهای مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)، مدول الاستیسیته

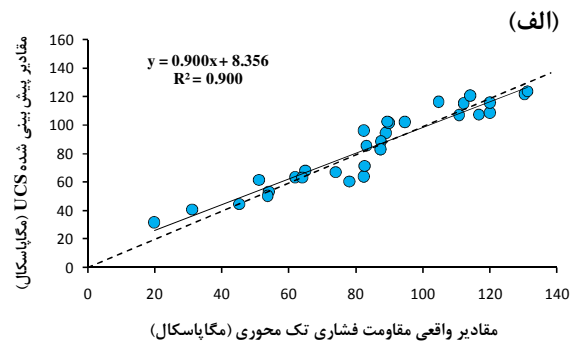
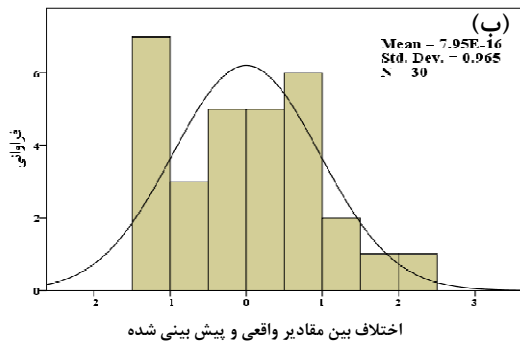
علاوه بر این در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ ارتباط و اختلاف بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده مقاومت فشاری تک محوری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی برزلی به ترتیب به‌وسیله روابط ۷، ۸ و ۹ نشان داده شده است.

همبستگی ۰/۹۴۹، ۰/۹۱۵ و ۰/۹۳۵ توسعه داده شده است که به‌وسیله روابط ۷، ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند:

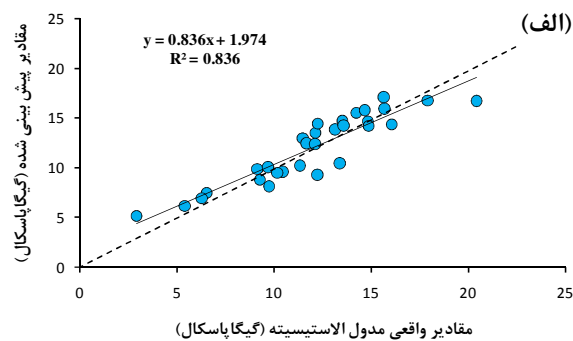
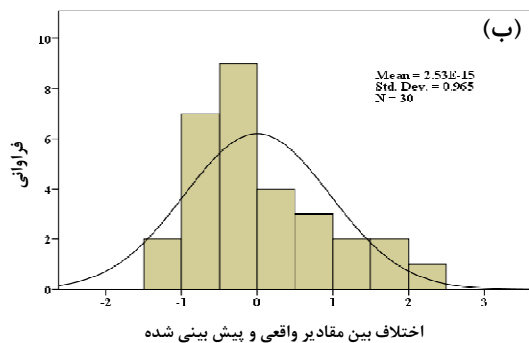
$$UCS = 0.028V_p + 1.316H_R - 29.410 \quad (۷)$$

$$E = 0.005V_p + 0.070H_R - 1.369 \quad (۸)$$

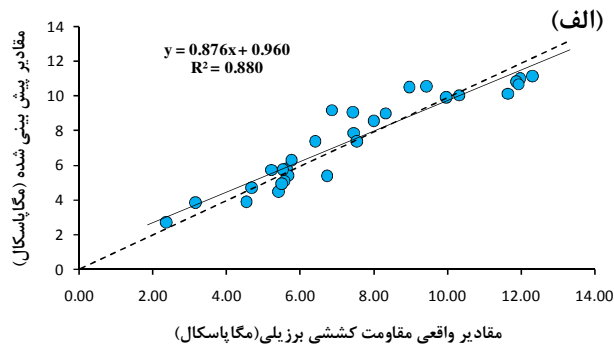
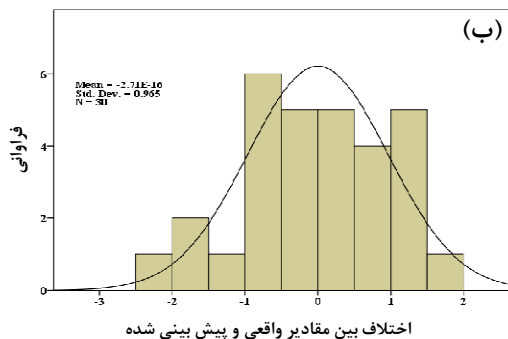
$$BTS = 0.002V_p + 0.219H_R - 4.011 \quad (۹)$$



شکل ۷. الف) ارتباط بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده مقاومت فشاری تک‌محوری به‌وسیله معادله ۷، ب) تفاوت بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده مقاومت فشاری تک‌محوری



شکل ۸. الف) ارتباط بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده مدول الاستیسیته به‌وسیله معادله ۸، ب) تفاوت بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده مدول الاستیسیته



شکل ۹. الف) ارتباط بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده مقاومت کششی برزلی به‌وسیله معادله ۹، ب) تفاوت بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده مقاومت کششی برزلی

به منظور بررسی اعتبارسنجی معادلات پیشنهاد شده، سطح معناداری ضرایب رگرسیونی معادلات ۷، ۸ و ۹ با استفاده از آزمون‌های t و F ارزیابی شده است. مقادیر t برای آنالیز رگرسیون خطی چند متغیره مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی برزیلی در جدول ۵ ارائه شده است. سطوح معناداری برای تمامی پارامترها در آزمون t کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد. به عبارت دیگر می‌توان نتیجه گرفت که یک ارتباط مهم و معناداری بین متغیرهای مستقل و وابسته به صورت انفرادی وجود دارد. همچنین مقادیر F برای مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی برزیلی به ترتیب ۱۲۲/۶۴، ۶۸/۸۵ و ۹۳/۹۴ می‌باشد که در جدول ۶ ارائه شده است.

همان‌طور که در این شکل‌ها نشان داده شده است، ارتباط مناسبی بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده توسط معادلات پیش‌بینی کننده توسعه داده شده در این مطالعه وجود دارد. بر این اساس، بهترین عملکرد پیش‌بینی مربوط به معادله ۷ برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری با $r = 0.949$ است. در حالی که معادله ۸ (مدول الاستیسیته) در مقایسه با دو معادله دیگر از دقت پیش‌بینی کمتری ($r = 0.914$) برخوردار است. همچنین نمودارهای هیستوگرامی نشان می‌دهند که توزیع اختلاف بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی کننده عمدتاً اطراف صفر متمرکز شده است که این موضوع بیانگر عملکرد مناسب معادلات پیشنهاد شده در پیش‌بینی پارامترهای مدنظر می‌باشد.

جدول ۵. نتایج آزمون t برای مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی برزیلی

سطح معناداری (sig.)	t	ضرایب استاندارد		مدل
		ضرایب غیراستاندارد	خطای استاندارد	
		بتا	B	
مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)				
۰/۰۰۳	-۳/۲۰۳	-	۹/۱۴۴	ضرایب ثابت
۰/۰۰۰	۴/۲۸۴	۰/۶۳۹	۰/۰۰۷	سرعت موج (Vp)
۰/۰۳۴	۲/۲۰۶	۰/۳۲۹	۰/۵۹۰	عدد سختی اشمیت (N)
مدول الاستیسیته (E)				
۰/۰۳۸	-۰/۸۸۴	-	۱/۵۳۷	ضرایب ثابت
۰/۰۰۰	۴/۱۱۸	۰/۷۹۰	۰/۰۰۱	سرعت موج (Vp)
۰/۰۴۸	۰/۷۰۲	۰/۱۳۵	۰/۰۹۹	عدد سختی اشمیت (N)
مقاومت کششی برزیلی (BTS)				
۰/۰۰۰	-۴/۰۸۵	-	۰/۹۸۱	ضرایب ثابت
۰/۰۳۴	۲/۲۳۳	۰/۳۷۵	۰/۰۰۱	سرعت موج (Vp)
۰/۰۰۲	۳/۴۵۵	۰/۵۸۰	۰/۰۶۳	عدد سختی اشمیت (N)

جدول ۶. نتایج آزمون F برای مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی برزیلی

سطح معناداری	آزمون F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	مدل
مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)					
۰/۰۰۰	۱۲۲/۶۳۶	۱۰۷۰۲/۳۶۶	۲	۲۱۴۰۴/۷۲۲	رگرسیون (regression)
-	-	۸۷/۲۶۹	۲۷	۲۳۵۶/۲۶۷	مانده (residual)
-	-	-	۲۹	۲۳۷۶۰/۹۹	کل (total)
مدول الاستیسیته (E)					
۰/۰۰۰	۶۸/۸۵۱	۱۶۹/۷۷۲	۲	۳۳۹/۵۴۳	رگرسیون (regression)
-	-	۲/۴۶۶	۲۷	۶۶/۵۷۶	مانده (residual)
-	-	-	۲۹	۴۰۶/۱۱۹	کل (total)
مقاومت کششی برزیلی (BTS)					
۰/۰۰۰	۹۳/۹۴۴	۹۴/۳۰۵	۲	۱۸۸/۶۰۹	رگرسیون (regression)
-	-	۱/۰۰۴	۲۷	۲۷/۱۰۴	مانده (residual)
-	-	-	۲۹	۲۱۵/۷۱۳	کل (total)

هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که آزمایش سرعت موج در مقایسه با آزمایش چکش‌اشمیت از درجه اطمینان بیش‌تری برای تخمین ویژگی‌های مکانیکی ماسه‌سنگ‌ها برخوردار است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان کمال تشکر را از گروه زمین‌شناسی دانشگاه بوعلی‌سینا به‌خاطر فراهم نمودن امکانات آزمایشگاهی برای انجام این پژوهش دارند.

منابع

بوستان، ح.، محمدی، ح.، شهریار، ک. (۱۳۹۳) پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ مگنتیت با استفاده از امواج اولتراسونیک و سختی اشمیت مطالعه موردی معدن شماره یک گل‌گهر. فصلنامه پژوهشی پژوهشگر، شماره ۱۳، ۷-۱.

حق‌نژاد، ع.، آهنگری، ک.، نورزاد، ع. (۱۳۸۹) بررسی ارتباط میان سرعت موج P با وزن واحد حجم، تخلخل و مقاومت فشاری تک‌محوری با استفاده از روش آماری و شبکه عصبی. مطالعه موردی: ساختگاه سد رودبار لرستان. یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، شماره ۸، سال چهارم، ۴۴-۵۳.

نجیبی، ع.، آصف، م.، اجل‌لوئیان، ر.، صفیان، غ.، ع. (۱۳۹۰) تخمین ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌آهک با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی. نشریه زمین‌شناسی مهندسی، شماره ۱، سال پنجم، ۱۱۷۶-۱۱۵۹.

Altindag, R (2012) Correlation between P-wave velocity and some mechanical properties for sedimentary rocks. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 112: 229-237.

Azimian, A., Ajalloeian, R (2015) Empirical correlation of physical and mechanical properties of marly rocks with P wave velocity. Arabian Journal of Geosciences, 8: 2069-2079.

Bell, FG (1978) The physical and mechanical properties of the fell sandstones, Northumberland, England. Engineering Geology, 12: 1-29.

Bell, FG (1994) A survey of the engineering properties of some anhydrite and gypsum from the north and midlands of England. Engineering Geology, 38: 1-23.

Bell, FG., Lindsay, P (1999) The petrographic and geotechnical properties of some sandstone from the newspaper member of the Natal Group near Durban, South Africa. Engineering Geology, 53: 57-81.

مشاهده می‌شود که سطح معناداری آماره F برای مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی برزیلی کم‌تر از ۰/۰۵ است. این بدین معنی است که نتایج حاصل شده به‌وسیله این مدل اتفاقی نیست. با بررسی نتایج آزمون t و F می‌توان نتیجه گرفت که روابط تجربی توسعه داده شده بین متغیرهای وابسته (مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی برزیلی) و متغیرهای مستقل (سرعت موج، عدد سختی چکش‌اشمیت) معنادار هستند.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه سعی شده است که ارتباط بین ویژگی‌های مکانیکی ماسه‌سنگ‌ها از قبیل مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی برزیلی با سرعت موج و عدد سختی چکش‌اشمیت مورد بررسی قرار گیرد. نتایج آنالیز رگرسیون خطی ساده نشان می‌دهد که روابط مستقیمی بین عدد سختی اشمیت و سرعت موج با ویژگی‌های مکانیکی وجود دارد و روابط تجربی زیر به منظور تخمین ویژگی‌های مکانیکی توسعه داده شده‌اند:

$$UCS = 0.041V_p - 15.40$$

$$UCS = 3.615H_R - 42.57$$

$$E = 0.005V_p + 0.621$$

$$E = 0.443H_R - 3.503$$

$$BTS = 0.003V_p - 1.680$$

$$BTS = 0.349H_R - 4.797$$

آنالیز رگرسیون چند متغیره خطی نشان داد که آزمایش سرعت موج و عدد سختی چکش‌اشمیت از قابلیت مناسبی برای پیش‌بینی ویژگی‌های مکانیکی ماسه‌سنگ‌ها برخوردارند. بر این اساس مشاهده شد که ضرایب همبستگی برای معادلات پیش‌بینی کننده مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی برزیلی با استفاده از سرعت موج و عدد سختی اشمیت به ترتیب ۰/۹۴۹، ۰/۹۱۴ و ۰/۹۳۵ می‌باشد. این نتایج هم‌چنین با انجام آزمون t و F اعتبارسنجی شده‌اند که نتایج حاصل شده نیز حاکی از سطح اطمینان بالای آن‌ها می‌باشد. روابط چند متغیره زیر به منظور تخمین ویژگی‌های مکانیکی توسعه داده شده‌اند:

$$UCS = 0.028V_p + 1.316H_R - 29.410$$

$$E = 0.005V_p + 0.070H_R - 1.369$$

$$BTS = 0.002V_p + 0.219H_R - 4.011$$

- Katz, O., Reches, Z., Roegiers, JC (2000) Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt hammer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37: 723–728.
- Khandelwal, M., Ranjith, PG (2010) Correlating index properties of rocks with P-wave measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 71: 1–5.
- Khandelwal, M., Singh, TN (2009) Correlating static properties of coal measures rocks with p-wave velocity. *International Journal of Coal Geology*, 79: 55–60.
- Kilic, A., Teymen, A (2008) Determination of mechanical properties of rocks using simple methods. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 67: 237–244.
- Kurtulus, C., Bozkurt, A., Endes, H (2012) Physical and Mechanical Properties of Serpentinized Ultrabasic Rocks in NW Turkey. *Pure Applied Geophysics*, 169: 1205–1215.
- Martínez-Martínez, J., Benavente, D., García-del-Cura, MA (2012) Comparison of the static and dynamic elastic modulus in carbonate rocks. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 71: 263–268.
- Sarkar, K., Vishal, V., Singh, TN (2012) An empirical correlation of index geomechanical parameters with the compressional wave velocity. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30: 469–479.
- Sharma, PK., Khandelwal, M., Singh, TN (2011) A correlation between Schmidt hammer rebound numbers with impact strength index, slake durability index and P-wave velocity. *International Journal of Earth Science (Geol Rundsch)*, 100: 189–195.
- Sharma, PK., Singh, TN (2008) A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 67: 17–22.
- Singh, RN., Hassani, FP., Elkington, PAS (1983) The application of strength and deformation index testing to the stability assessment of coal measures excavations. *Proceedings of 24th US symposium on rock mechanics, Texas A&M Univ, AEG*, pp 599–609.
- Turgrul, A., Zarif, IH (1999) Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering Geology*, 51: 303–317.
- Vasconcelos, G., Lourenço, PB., Alves, CSA., Pamplona, J (2007) Predication of the mechanical properties of granites by ultrasonic pulse velocity and Schmidt hammer hardness. *Tenth North American Masonry Conference, Missouri, SA*.
- Cargill, JS., Shakoor A (1990) Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 27: 495–503.
- Cobanoglu, I., Celik, SB (2008) Estimation of uniaxial compressive strength from point load strength, Schmidt hardness and P-wave velocity. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 67: 491–498.
- Deere, DU., Miller, RP (1966) Engineering classification and index properties for intact rock. *Air Force Weapons Lab. Technical Report, AFWL-TR 65-116, Kirtland Base, New Mexico*.
- Diamantis, K., Bellas, S., Migiros, G., Gartzos, E (2011) Correlating wave velocities with physical, mechanical properties and petrographic characteristics of peridotites from the Central Greece. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29 (6): 1049–1062.
- Dincer, I., Altay, A., Cobanoglu, I., Uras, Y (2004) Correlation between Schmidt hardness, uniaxial compressive strength and Young's modulus for andesites, basalts and tuffs. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 63: 141–148.
- Folk, RL (1974) *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill, Austin, 600p.
- Goktan, RM (1988) *Theoretical and practical analysis of rock rippability*. Ph.D. thesis, Istanbul Technical University.
- Haramy, KY, DeMarco, MJ (1985) Use of Schmidt hammer for rock and coal testing. *Proceedings of 26th US symposium on rock mechanics, 26–28 June, Rapid City*, pp 549–555.
- ISRM, (1981) *Rock characterization, testing and monitoring, ISRM suggested methods*. International Society for Rock Mechanics, 211pp.
- Jamshidi, A., Nikudel, M., Khamehchiyan, M., Zarei Sahamieh, R., Abdi, Y (2016) A correlation between P-wave velocity and Schmidt hardness with mechanical properties of travertine building stones. *Arabian Journal of Geosciences*, 9: 568–580.
- Kahraman, S (2001) Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38: 981–994.
- Kahraman, S., Gunaydin, O., Alber, M., Fener, M (2009) Evaluating the strength and deformability properties of Misis fault breccia using artificial neural networks. *Expert Systems with Applications*, 36: 6874–6878.
- Kahraman, S., Yeken, T (2008) Determination of physical properties of carbonate rocks from P-wave velocity. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 67: 277–281.

- Yagiz, S (2011b) P-wave velocity test for assessment of geotechnical properties of some rock materials. *Bulletin Material Science* 34(4): 947-953.
- Yasar, E., Erdogan, Y (2004) Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41: 871-875.
- Yılmaz, I., Sendir, H (2002) Correlation of Schmidt hammer rebound number with unconfined compressive strength and Young's modulus in gypsum from Sivas (Turkey). *Engineering Geology*, 66: 211-219.

Estimation of mechanical properties of sandstones using P-wave velocity and Schmidt hardness

Y. Abdi^{*1} and Gh .R. Khanlari²

1- Dept., of Geology, Lorestan University, Khoramabad

2- Dept., of Geology, Bu-Ali Sina University, Hamedan

* abdi.ya@lu.ac.ir

Received: 2018/6/19 Accepted: 2018/9/22

Abstract

Uniaxial compressive strength (UCS), modulus of elasticity (E) and Brazilian tensile strength (BTS) are important properties of intact rock which are used widely in rock engineering. The determination of these parameters in laboratory is difficult, expensive and time consuming. Thus, it has been attempted that the empirical equations to estimate the mechanical properties of sandstones using P-wave velocity and Schmidt hardness as two non-destructive and easy tests were developed. For this purpose, 30 rock blocks of sandstone have been collected from several parts of Upper red formation in southwestern Qom and they were tested in the laboratory. The laboratory tests include the determination of P-wave velocity and Schmidt hardness, and mechanical properties include the uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and Brazilian tensile strength. Empirical equations have been developed for estimating the mechanical properties from P-wave velocity and Schmidt hardness using regression analysis. To check the validity of the empirical equations, t and F test were performed, which confirmed the validity of the proposed empirical equations. Moreover, the results show that P-wave velocity appears to be more reliable than the Schmidt hardness for estimating the mechanical properties.

Keywords: Mechanical properties, P-wave velocity, Schmidt hardness, Sandstone, Regression